Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics, 37, 3, 2025. (59-78)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Experimental and statistical examination the effects of machining parameters and insert type on tool wear and surface quality in turning of Inconel 718*

Research Article

Mohammad Baraheni[1], Vahid Tahmasbi[2], Mohammad Tavakkolipour[3], Mohammad Masoud Ghazi Esfahani[4]

10.22067/jacsm.2025.90927.1300

Abstract-- **Inconel 718 is a nickel-based superalloy widely used in advanced industries such as aerospace and energy due to its excellent resistance to heat, pressure, and corrosion. However, machining this alloy is highly challenging due to its hardness and tendency to cause rapid tool wear, making it a demanding process for producing precision components. This study examines the effects of machining parameters on tool wear and surface roughness during the turning of Inconel 718. Using the Taguchi design of experiments and desirability optimization method, the influence of feed rate, depth of cut, spindle speed, and insert type on tool wear and surface roughness was evaluated. The results revealed that feed rate had the most significant impact, while depth of cut also played a critical role in tool wear. Additionally, DNMG inserts exhibited lower wear compared to TNMG inserts. Optimal machining conditions were identified to minimize tool wear and surface roughness. These findings can enhance machining processes for heat-resistant alloys, improve efficiency, and reduce production costs.**

***Key Words*. Inconel 718, Turning, Tool wear, Surface quality, Optimization**

1- Introduction

Inconel 718 is a nickel-based superalloy with a unique composition (including nickel, chromium, iron, and other alloying elements) that exhibits exceptional thermal resistance, corrosion resistance, and mechanical properties, making it suitable for aerospace, oil and gas, and chemical industries [1]. Machining this alloy is challenging due to its high hardness, tendency to adhere to cutting tools, and excessive heat generation, thus requiring optimal parameter selection and the use of suitable tooling and cooling strategies [2, 3]. Numerous studies have examined the influence of cutting parameters such as speed, feed rate, depth of cut, and tool geometry on surface roughness, cutting forces, tool wear, and surface quality [4-6], yet comprehensive investigations into the interactive effects of these parameters and different insert types remain limited. The present study adopts a systematic approach to simultaneously evaluate key parameters and two common inserts (TNMG and DNMG) to identify optimal conditions for achieving high surface quality and extending tool life in Inconel 718 turning operations.

2- Materials and Methodology

In this study, turning operations were performed on an Inconel 718 shaft with a length of 400 mm and a diameter of 24 mm using a TN50BR lathe manufactured in Tabriz. Four input parameters—insert type, spindle speed, feed rate, and depth of cut—were examined. To reduce the number of experiments and costs, the Taguchi Design of Experiments method with an orthogonal array was applied, resulting in a total of 18 tests conducted without cutting fluid. TNMG inserts with six cutting edges and DNMG inserts with a 55° angle and 0.8 mm nose radius were used, known respectively for high thermal resistance and reduced cutting forces. Surface roughness was measured using a TIME 3100 surface roughness tester`, and the experimental shaft was divided into 18 sections Figure (1). Tool wear and surface roughness were considered as the two main output parameters in this investigation.

3- Results and Discussion

In this study, optimization of the turning process of Inconel 718 was carried out with a focus on reducing tool wear and improving surface quality. Experiments based on the Taguchi Design of Experiments and ANOVA statistical analysis revealed that feed rate is the most influential factor for both output parameters; for tool wear, feed rate accounts for 21% of the variation, while its quadratic relationship has a significant 43% contribution. Insert type and depth of cut also have statistically significant but smaller effects, whereas spindle speed showed a minimal and non-significant influence. For surface roughness, feed rate with a 6.28% contribution (and 91.77% for its

* Manuscript received November 22, 2024, Revised December 2, 2024, Accepted January 18, 2025.

[1] Corresponding author. Assistant Professor, Manufacturing Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.
Email: mbaraheni@arakut.ac.ir

[2] Associate professor, Manufacturing Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

[3] Master Student, Manufacturing Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran.

[4] Master Student, Manufacturing Engineering Department, Arak University of technology, Arak, Iran.

quadratic term) was again the dominant factor, while depth of cut, insert type, and spindle speed had no significant impact. Main effects plots Figure (2) & Figure (3) indicated that depth of cut and feed rate have nonlinear effects on both wear and roughness, with DNMG inserts outperforming TNMG in reducing wear.

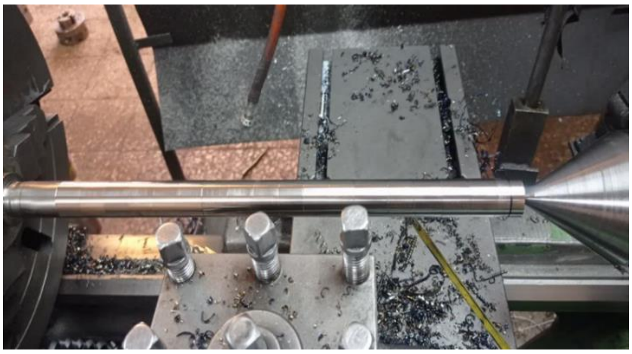


Figure 1. Dividing the shaft to 18 sections.

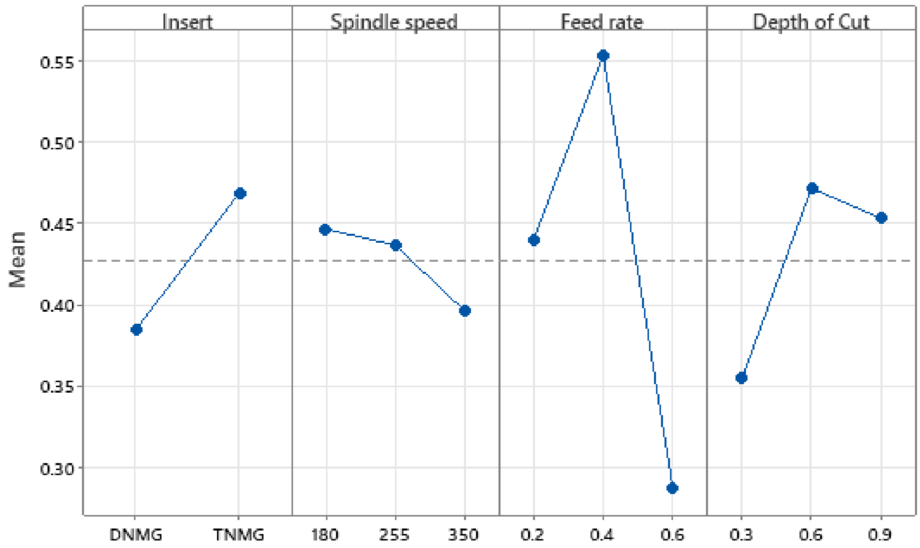


Figure 2. Main effects plot on tool wear.

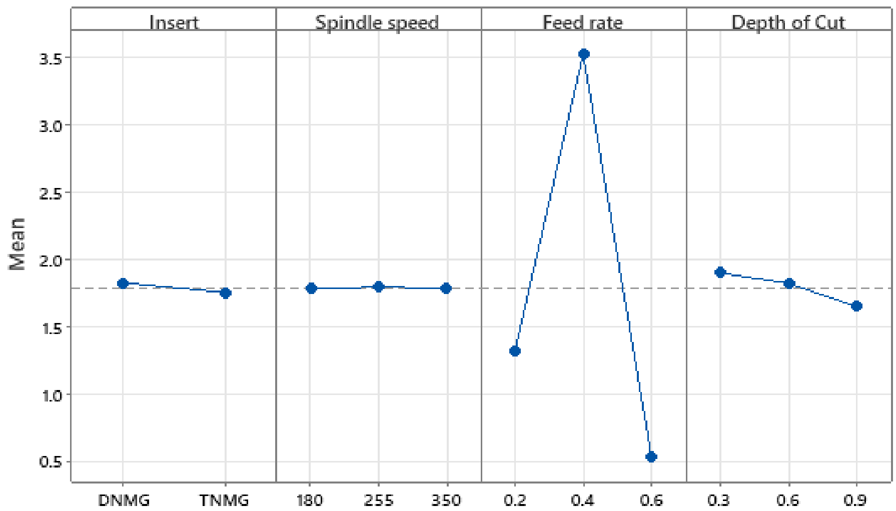


Figure 3. Main effects plot on surface roughness.

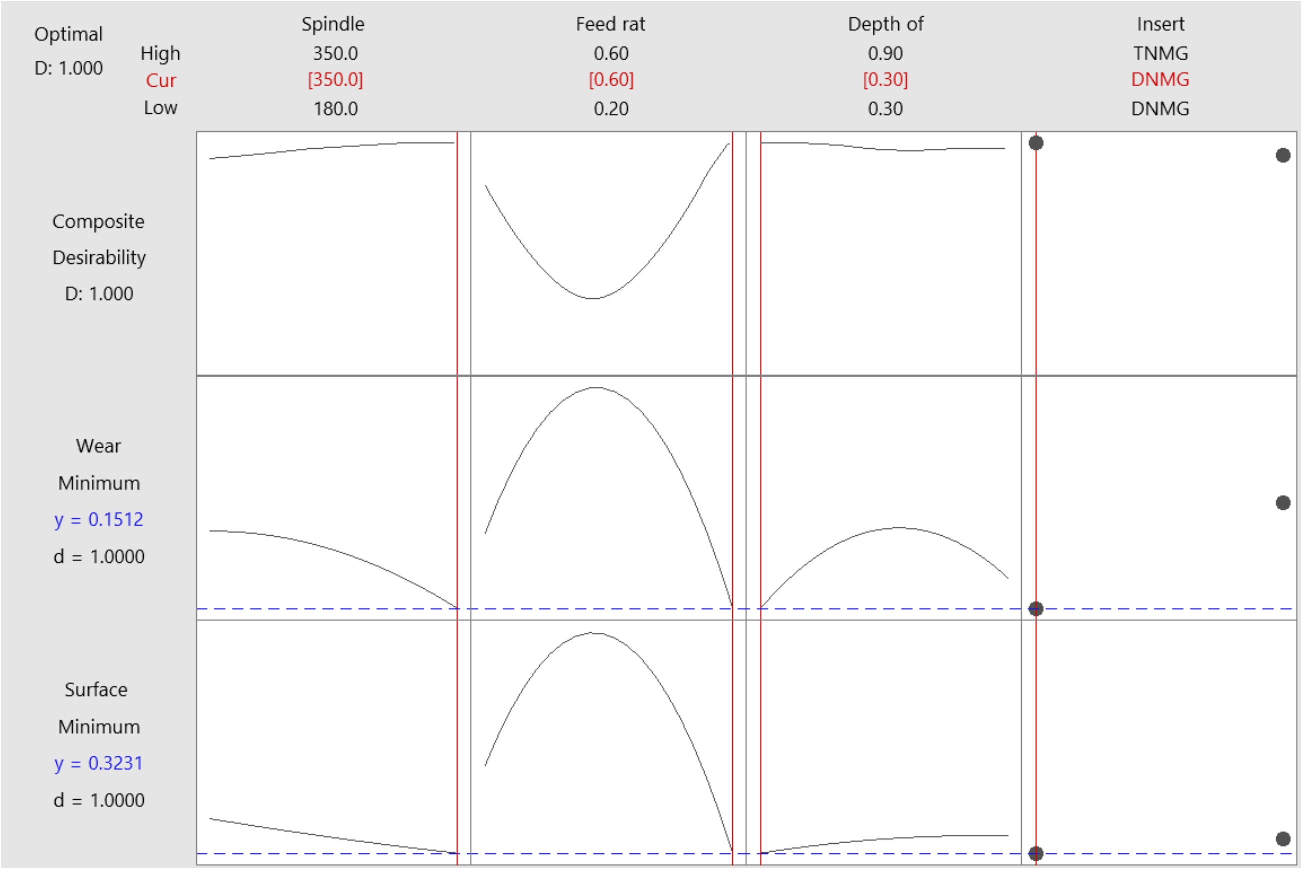


Figure 4.Optimization plot based on Desirability approach.

Using the desirability function approach [7], the optimal process settings were identified as a spindle speed of 350 rpm, feed rate of 0.6 mm/rev, depth of cut of 0.3 mm, and the use of DNMG inserts, achieving a desirability value of 1.0 for both tool wear and surface roughness Figure (4). The results demonstrate that simultaneous parameter optimization can substantially enhance surface quality and tool life. Furthermore, the nonlinear behavior of key parameters—particularly feed rate and depth of cut—highlights the importance of multivariate analysis and advanced optimization techniques in the machining of high-temperature alloys.

4- Conclusion

The results of this study revealed that in the turning of Inconel 718, feed rate is the most influential factor on both tool wear and surface roughness, exhibiting a nonlinear behavior where intermediate values lead to simultaneous improvement of both responses. Depth of cut has a significant but smaller effect on tool wear and a statistically insignificant effect on surface roughness, while spindle speed plays the least role. Insert type also influences tool wear, with DNMG inserts outperforming TNMG in reducing wear, though the difference in surface roughness is negligible. Optimization using the desirability function identified optimal conditions of 350 rpm spindle speed, 0.6 mm/rev feed rate, 0.3 mm depth of cut, and DNMG insert, achieving a desirability value of 1 for both responses. These findings highlight the importance of selecting optimal cutting parameters and suitable tooling to enhance surface quality, extend tool life, and reduce machining costs for Inconel 718.

References

[1] D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, "Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 64, pp. 60–77, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001

[2] H. Khochtali, Y. Ayed, F. Zemzemi, and W. Bensalem, "Tool wear characteristics in rough turning of Inconel 718 with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 2371–2386, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07002-9

[3] F. Jafarian, D. Umbrello, S. Golpayegani, and Z. Darake, "Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 13, pp. 1683–1691, 2016. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090592

[4] X. Liang, Z. Liu, and B. Wang, "State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A

review," *Measurement*, vol. 132, pp. 150–181, 2019. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.045

[5] P. Jeyapandiarajan and A. Xavior, "Influence of cutting condition on machinability aspects of Inconel 718," *Journal of Engineering Research*, vol. 7, no. 2, 2019.

[6] W. Frifita, S. B. Salem, A. Haddad, and M. A. Yallese, "Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 nickel-base super alloy," *Mechanics & Industry*, vol. 21, no. 2, p. 203, 2020. https://doi.org/10.1051/meca/2020001

[7] A. Tabatabaeian, M. Baraheni, S. Amini, and A. R. Ghasemi, "Environmental, mechanical and materialistic effects on delamination damage of glass fiber composites: Analysis and optimization," *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 26–27, pp. 3671–3680, 2019. https://doi.org/10.1177/0021998319844811

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

بررسی تجربی و آماری تاثیر پارامتر های ماشینکاری و نوع اینسرت بر سایش ابزار و کیفیت سطح در تراشکاری اینکونل ۷۱۸ *

مقاله پژوهشی

محمد براهنی(۱) وحید طهماسبی(۲) محمد توکلی پور(۳) محمد مسعود غازی اصفهانی(۴)

DOI: 10.22067/jacsm.2025.90927.1300

چکیده *آلیاژ اینکونل ۷۱۸ از ابرآلیاژهای پایه نیکل است که به دلیل مقاومت بالا در برابر حرارت، فشار و خوردگی، کاربرد گسترده‌ای در صنایع پیشرفته مانند هوافضا و انرژی دارد. ماشینکاری این آلیاژ به دلیل سختی بالا و تمایل به سایش ابزار، یکی از چالش‌برانگیزترین فرآیندها در تولید قطعات دقیق محسوب می‌شود. در این پژوهش، اثر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار و زبری سطح در فرآیند تراشکاری اینکونل ۷۱۸ بررسی شده است. با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی و روش بهینه‌سازی مطلوبیت، تأثیر نرخ پیشروی، عمق برش، سرعت دورانی و نوع اینسرت بر سایش ابزار و زبری سطح ارزیابی شد. نتایج نشان داد که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را دارد و عمق برش نیز نقش مهمی در سایش ابزار ایفا می‌کند. همچنین اینسرت DNMG سایش کمتری نسبت به TNMG ایجاد کرد. شرایط بهینه ماشینکاری برای کاهش سایش ابزار و زبری سطح شناسایی شد. این نتایج می‌تواند به بهبود فرآیند ماشینکاری آلیاژهای مقاوم به حرارت کمک کرده و موجب افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید شود.*

واژه های کلیدی اینکونل ۷۱۸، تراشکاری، سایش ابزار، کیفیت سطح، بهینه‌سازی.

مقدمه

آلیاژهای اینکونل گروهی از سوپرآلیاژهای مبتنی بر نیکل هستند که مقاومت لازم را در طیف وسیعی از دماها دارند. به طوری که در دمای بالا یک لایه اکسید قوی و پایدار بر روی سطح این آلیاژ تشکیل شده و از خوردگی بیشتر جلوگیری می کند [1]. اینکونل ۷۱۸ عمدتا از نیکل (۵۰-۵۵٪)، کروم (۱۷-۲۱٪) و آهن (۱۷-۲۱٪) تشکیل شده است. همچنین حاوی مقادیر کمتری از عناصر دیگر مانند نیوبیوم (۴/۷۵-۵/۵٪)، مولیبدن (۲/۸-۳/۳٪)، تیتانیوم (۰/۶۵٪ -۱/۱۵٪) آلومینیوم (۰/۲-۰/۸٪) و کربن (۰/۰۸٪ حداکثر) است [2]. این ترکیب منحصر به فرد آلیاژ موجب استحکام، مقاومت خوردگی و پایداری در دمای بالا کمک می کند. اینکونل ۷۱۸ خواص مکانیکی استثنایی از خود نشان می دهد و برای کاربردهای سخت مناسب است. اینکونل ۷۱۸ می‌تواند دماهای بسیار بالا تا حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کند و این ویژگی‌ها آن را برای کاربردهای حساس و پیشرفته مانند هوافضا، صنایع نفت و گاز، و صنایع شیمیایی مناسب می‌سازد. اینکونل ۷۱۸ همچنین دارای مقاومت عالی در برابر خوردگی و اکسیداسیون می‌باشد. در ماشینکاری اینکونل ۷۱۸، لبه برش تحت بارهای حرارتی مکانیکی شدید قرار می گیرد [3] که این امر منجر به نرم شدن حرارتی لبه ابزار و کاهش سختی و استحکام لبه می شود [4]. کاربرد های اینکونل عبارت است از؛ کاربردهای اینکونل ۷۱۸ صنایع هوافضا: برای ساخت قطعات موتورهای جت و توربین‌های گازی استفاده می‌شود - . صنایع نفت و گاز: در تجهیزات حفاری و استخراج نفت و گاز کاربرد دارد - .صنایع شیمیایی: در تولید تجهیزات مقاوم به خوردگی مانند مخازن و پمپ‌ها استفاده می‌شود.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۹/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ می باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

Email: mbaraheni@arakut.ac.ir

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

(۳) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

(۴) دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی اراک، اراک.

در فرآیند تراشکاری، ابزار برشی با استفاده از حرکت خطی یا دورانی بر روی سطح قطعه کار، مواد زائد را از روی آن حذف می‌کند. در این فرآیند، تنظیم دقیق پارامترهای ماشینکاری بسیار اهمیت دارد تا بتوان به کیفیت سطح بالا و سایش کمتر ابزار دست یافت. دمای بالا در حین فرآیند تراشکاری می‌تواند تاثیرات منفی بر روی ابزار برشی و کیفیت سطح قطعه کار داشته باشد. استفاده از روانکارها و خنک‌کننده‌های مناسب می‌تواند به کاهش دمای تولیدی و افزایش عمر ابزار کمک کند. تراشکاری اینکونل ۷۱۸ به دلیل سختی بالا و تمایل به چسبیدن به ابزار برشی، با چالش‌های زیادی همراه است. برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از ابزارهای با پوشش‌های مقاوم به سایش، روانکارهای مناسب و تکنیک‌های خنک‌کننده پیشرفته ضروری است. همچنین، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری کمک کند.

هنگام ماشینکاری این آلیاژ، دستیابی به دقت ابعادی و تکمیل سطح لازم، ممکن است دشوار باشد [5]. هندسه لبه برش، سرعت پیشروی، سرعت برش، و عمق برش همگی تأثیر قابل توجهی بر معیارهای عملکردی مانند زبری سطح، نیروی برش، سایش ابزار و تنش پسماند روی سطوح ماشینکاری شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ دارند. لیانگ و همکاران [6] تأثیر سایش ابزار را بر یکپارچگی سطح اینکونل ۷۱۸ بررسی کردند. ویژگی‌های یکپارچگی سطح از جمله توپوگرافی سطح (نقایص سطح و زبری سطح)، تغییرات ریزساختاری (تغییر شکل پلاستیک، اندازه دانه‌ها و لایه سفید)، و خواص مکانیکی (ریزسختی و تنش پسماند) بررسی شدند. جایاپندیارجان و همکاران [7] تأثیر شرایط و پارامترهای برش بر انتخاب جنس قطعه‌کار و ابزار در تراشکاری اینکونل ۷۱۸ را بررسی کردند. فاطلومه ژوجانی و همکاران [8] از طراحی آزمایش L9 (۳۴) مبتنی بر تاگوچی برای یافتن بهترین مقادیر برای پارامترهای فرآیند مانند سرعت برش، سرعت تغذیه، عمق برش و شعاع دماغه ابزار استفاده کردند. در این مطالعه، روش رابطه خاکستری چند هدفه مبتنی بر تاگوچی (GRA) برای رسیدگی به مشکل تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ به منظور افزایش بهره وری، یعنی با به حداقل رساندن همزمان زبری سطح، سایش ابزار و زمان ماشینکاری استفاده شد. پاواده و همکارانش[9] به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی و هندسه ابزار بر نیروهای برشی، زبری سطح و آسیب سطح در ماشین‌کاری سرعت بالای اینکونل ۷۱۸ با ابزارهای PCBN پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که نیروی برش اصلی ۲ تا ۳ برابر بیشتر از نیروهای پیشروی و شعاعی است و ابزار با پخ به طور قابل توجهی نیروهای برشی را کاهش داده است. همچنین، نمونه‌هایی با نیروهای برشی بیشتر، کیفیت سطح ضعیف‌تری و آسیب‌های سطحی بیشتری داشته‌اند. خان و همکارانش [10] نتایج ماشین‌کاری اینکونل ۷۱۸ با اینسرت‌های PCBN غلظت پایین را بررسی کردند. آزمایش‌ها با استفاده از طرح L36 Taguchi برای ارزیابی تأثیر عوامل مختلفی مانند هندسه ابزار، آماده‌سازی لبه، فشار سیال، پوشش ابزار، سرعت برش و نرخ پیشروی انجام شد. نتایج نشان داد که در سرعت برش ۱۵۰ متر در دقیقه، عمر ابزار گرد ۵ برابر بیشتر از ابزار نوع C بود. با افزایش سرعت به ۳۰۰ متر در دقیقه، عملکرد هر دو ابزار مشابه شد، اما در ۴۵۰ متر در دقیقه شکست ابزار رخ داد و عمر آن به ۳٫۵ دقیقه کاهش یافت. سایش ناشی از چسبندگی اصلی‌ترین عوامل تخریب ابزار بودند. فریفیتا و همکارانش [11] با هدف بهینه‌سازی پارامترهای تراشکاری اینکونل ۷۱۸ با استفاده از ابزار برش کاربید برای دستیابی به حداقل زبری سطح، نیروی برش، توان، انرژی ویژه و حداکثر بهره‌وری، پژوهشی انجام دادند. از روش‌های تحلیل واریانس (ANOVA) و پاسخ سطحی (RSM) همراه با تابع مطلوبیت برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر پاسخ‌ها و توسعه مدل پیش‌بینی استفاده شده است. نتایج نشان داد که شعاع نوک ابزار، نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برش تأثیر قابل توجهی بر زبری سطح و نیروهای برش دارند. پینهایرو و همکارانش [12] پژوهشی با هدف بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ انجام دادند. از طرح آزمایش تاگوچی برای ارزیابی تأثیر پارامترهایی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی، نوع ابزار و روانکاری بر کیفیت سطح استفاده شده است. نتایج نشان داد که سرعت برش و نرخ پیشروی تأثیر قابل توجهی بر کیفیت سطح دارند. سرعت برش بهینه ۷۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی بهینه ۰٫۱ میلی‌متر بر دور تعیین شده است. افزایش نرخ پیشروی منجر به افزایش مصرف توان، ارتعاش و سایش ابزار می‌شود. مصرف توان به عنوان یک شاخص حساس نسبت به پارامترهای ماشینکاری می‌تواند در مطالعات پیش‌بینی سایش ابزار برای ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ استفاده شود. ژوجانی و همکارانش [13] از طراحی آزمایش‌های

مبتنی بر تاگوچی و رویکرد رابطه خاکستری چندهدفه (GRA) برای کاهش زبری سطح، سایش ابزار و زمان ماشین‌کاری استفاده کردند. نتایج نشان داد که شرایط بهینه شامل سرعت برش ۱۰۰ متر در دقیقه، نرخ تغذیه ۰/۰۵۱ میلی‌متربر دور، عمق برش ۰/۴ میلی‌متر و شعاع نوک ابزار ۰/۴ میلی‌متر است. تان و همکارانش [14] با هدف بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح قطعه کار در فرآیند تراشکاری آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با استفاده از دو نوع اینسرت سرامیکی و کاربیدی، پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان داد که نوع اینسرت، سرعت برش، عمق برش و نرخ پیشروی بر کیفیت سطح تأثیرگذار هستند. اینسرت سرامیکی نسبت به اینسرت کاربیدی، سطح صاف‌تر و یکنواخت‌تری تولید می‌کند. توزیع تنش‌های باقیمانده و میکروسختی در هر دو نوع اینسرت مشابه است. هیچ تغییر شکل پلاستیکی شدید با اینسرت کاربیدی یا سرامیکی مشاهده نشده است.

در این پژوهش، مطالعه‌ای جامع با هدف بررسی اثرات متقابل پارامترهای مختلف ماشینکاری بر کیفیت سطح و سایش ابزار در فرایند تراشکاری آلیاژ مقاوم به حرارت اینکونل ۷۱۸ انجام شده است. اینکونل ۷۱۸ به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برتر و مقاومت عالی در برابر حرارت، یکی از آلیاژهای پرکاربرد در صنایع هوافضا، نفت و گاز و نیروگاهی است. با این حال، ماشینکاری این آلیاژ به دلیل سختی بالا، تمایل به سایش ابزار و تولید گرمای زیاد در حین فرآیند، چالش‌های فراوانی را به همراه دارد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای کلیدی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش بر کیفیت سطح نهایی و نرخ سایش ابزار بررسی شده است. برای این منظور، دو نوع اینسرت رایج TNMG و DNMG انتخاب و رفتار آن‌ها در شرایط ماشینکاری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل نتایج به منظور یافتن بهینه‌ترین شرایط ماشینکاری برای دستیابی به سطحی با کیفیت بالا و افزایش عمر ابزار، بخش کلیدی این مطالعه محسوب می‌شود. علیرغم اهمیت صنعتی اینکونل ۷۱۸ و چالش‌های موجود در ماشینکاری آن، پژوهش‌های گذشته عمدتا بر تأثیر یک‌جانبه برخی پارامترها متمرکز بوده و بررسی‌های محدودی به مطالعه جامع تأثیر متقابل انواع اینسرت‌ها و پارامترهای ماشینکاری بر کیفیت سطح و عمر ابزار پرداخته‌اند. در این تحقیق، با اتخاذ رویکردی سیستماتیک و جامع، تلاش شده است تا شکاف موجود در پژوهش‌های پیشین پوشش داده شود و داده‌های ارزشمندی برای بهبود فرایند ماشینکاری این آلیاژ استراتژیک ارائه شود. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی عملی برای بهینه‌سازی فرایند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و آزمایش‌ها

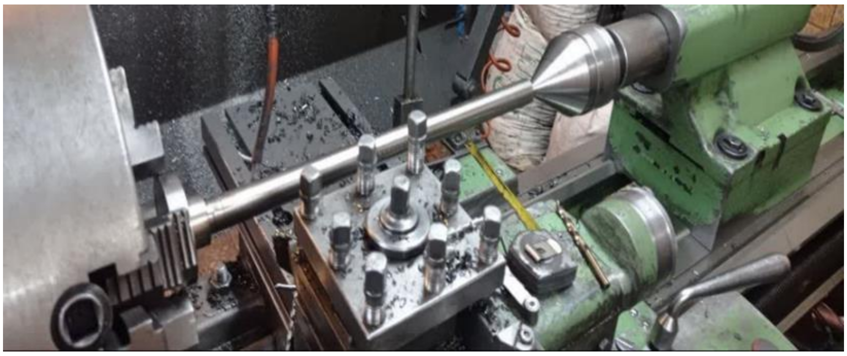
در این پژوهش، عملیات تراشکاری بر روی شفت اینکونل با طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۴ میلی‌متر، مطابق شکل (۱) انجام شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه تراش TN50BR ساخت تبریز انجام گرفت. چهار پارامتر ورودی در این آزمایش‌ها در نظر گرفته شد: نوع اینسرت، سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش. در روش‌های سنتی، انجام آزمایش‌ها به دلیل پیچیدگی و تعداد زیاد جایگشت‌های مختلف دشوار و زمان‌بر است. این مسئله زمانی بیشتر مشهود می‌شود که تعداد متغیرهای مسئله افزایش یابد، چرا که در این حالت تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد. برای کاهش منابع مصرفی و زمان مورد نیاز، می‌توان از روش‌های نوین طراحی آزمایش استفاده کرد. یکی از این روش‌ها، روش تاگوچی است. این روش با بهره‌گیری از ترکیب فاکتوریل جزئی و آرایه‌های متعامد، به طراحی آزمایشی بهینه و کم‌هزینه منجر می‌شود که همچنان نتایج کافی و معتبری ارائه می‌دهد [15]. در این مطالعه نیز طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی صورت گرفت و مجموعا ۱۸ آزمایش، مطابق جدول (۱) انجام شد. طول هر ناحیه ماشین‌کاری در این آزمایش‌ها ۲۰ میلی‌متر بود. از دو نوع اینسرت TNMG و DNMG با شعاع نوک ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد. در این فرآیند تراشکاری، از هیچ سیال برشی استفاده نگردید.

اینسرت‌های TNMG بیشتر در فرآیندهای روتراشی و داخل‌تراشی به کار می‌روند و دارای ۶ لبه برشی هستند. این نوع اینسرت‌ها برای ماشین‌کاری فولاد، چدن، آلیاژهای با دمای بالا و مواد غیر آهنی مناسب هستند و در مقایسه با ابزارهای فولادی با سرعت بالا، مقاومت حرارتی بیشتری دارند. اینسرت‌های DNMG معمولا با زاویه ۵۵ درجه به کار می‌روند. اینسرت‌های DNMG در مقایسه با اینسرت‌هایی با زوایای بیشتر، نیروی برشی کمتری تولید می‌کنند. ساختار خاص این اینسرت‌ها به کاهش ترک‌خوردگی در حین کار کمک می‌کند و برای ماشین‌کاری فولادهای کربنی، فولادهای ضد زنگ و آلیاژهای دما بالا مناسب

هستند.

زبری سطح با استفاده از دستگاه زبری‌سنج TIME 3100 که در شکل (۲) نشان داده شده، اندازه‌گیری شد. زبری سنج مدل TIME 3100 ساخت کمپانی TIME از کشور چین است. دستگاه زبری سنج سطوح تایم ۳۱۰۰ با طراحی کاربردی و خاص مناسب زبری سنجی انواع سطوح ماشین کاری شده می باشد. تستر زبری سطوح مدل TIME3100 ابزاری با قیمت اقتصادی در اندازه جیبی است که برای اندازه گیری بافت سطوح مطابق با استانداردها کاربرد دارد.

همچنین شفت مورد آزمایش به ۱۸ قسمت تقسیم شد که در شکل (۳) قابل مشاهده است. در این پژوهش، سایش ابزار و زبری سطح به عنوان دو پارامتر خروجی مهم در نظر گرفته شدند.



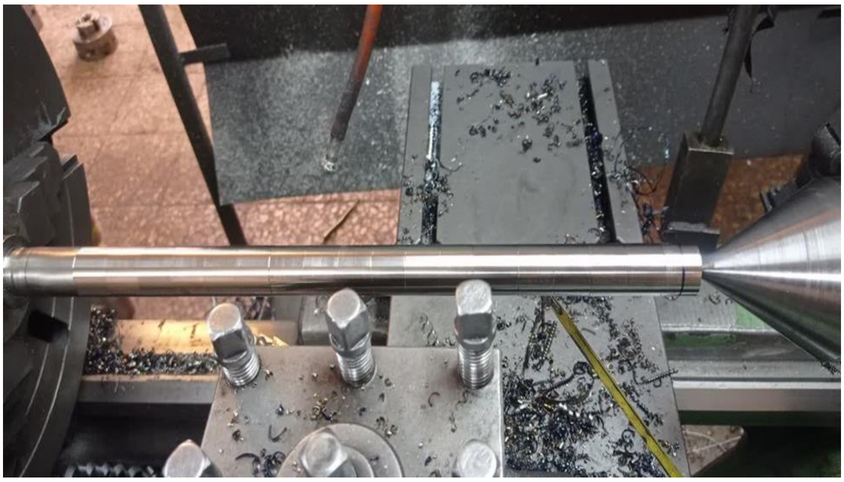
شکل ۱ شفت اینکونل حین تست ماشینکاری

جدول ۱ طراحی آزمایش تاگوچی (L18)

شماره آزمون	عمق برش	نرخ پیشروی	سرعت اسپیندل	نوع اینسرت
1	0.3	0.2	180	TNMG
2	0.6	0.4	180	TNMG
3	0.9	0.6	180	TNMG
4	0.3	0.2	255	TNMG
5	0.6	0.4	255	TNMG
6	0.9	0.6	255	TNMG
7	0.3	0.2	350	TNMG
8	0.6	0.4	350	TNMG
9	0.9	0.6	350	TNMG
10	0.3	0.2	180	DNMG
11	0.6	0.4	180	DNMG
12	0.9	0.6	180	DNMG
13	0.3	0.2	255	DNMG
14	0.6	0.4	255	DNMG
15	0.9	0.6	255	DNMG
16	0.3	0.2	350	DNMG
17	0.6	0.4	350	DNMG
18	0.9	0.6	350	DNMG



شکل ۲ زبری سنج TIME 3100



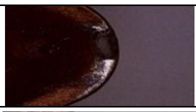
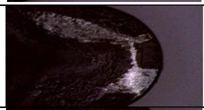
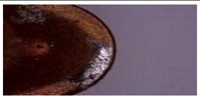
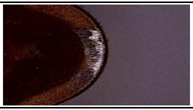
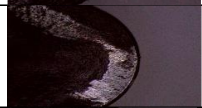
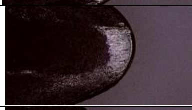
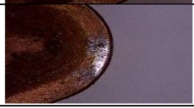
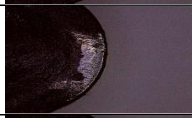
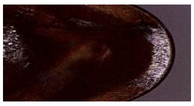
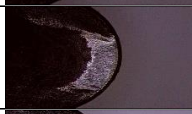
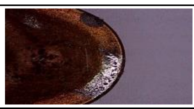
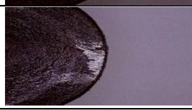
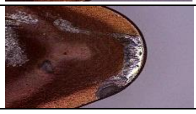
شکل ۳ تقسیم کردن شافت به ۱۸ قسمت مساوی

نتایج و بحث

با بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری و استفاده از تکنیک‌ها و مواد نوین، می‌توان بهبود قابل‌توجهی در فرآیند تراشکاری این آلیاژ ایجاد کرد. انتخاب صحیح پارامترهای ماشینکاری، استفاده از ابزارهای مناسب و استفاده از تکنیک‌های خنک‌کننده پیشرفته، می‌توانند به کاهش سایش ابزار و بهبود کیفیت سطح کمک کنند و بهره‌وری فرآیند را افزایش دهند. این بهبودها می‌توانند هزینه‌های تولید را کاهش داده و عمر مفید قطعات تولیدی را افزایش دهند. به عنوان مثال، در فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸، بهینه‌سازی نرخ پیشروی و عمق برش می‌تواند تأثیر زیادی بر سایش ابزار و کیفیت سطح داشته باشد. همچنین استفاده از اینسرت‌های مناسب با پوشش‌های نوین و بهینه‌سازی شرایط خنک‌کننده می‌تواند عمر ابزار را افزایش دهد و کیفیت سطح را بهبود بخشد.

با انجام آزمون‌های سایش بر روی هر یک از اینسرت‌ها، میزان سایش ابزار به دقت اندازه‌گیری و در جدول (۲) ارائه شده است. علاوه بر سایش ابزار، زبری سطح قطعه کار نیز در هر آزمون به عنوان یک پارامتر کلیدی ارزیابی شده است. با اندازه‌گیری طول و عرض ناحیه ساییده شده و محاسبه مساحت آن، میزان سایش کمی‌سازی شده است. همچنین، از پارامتر زبری سطح R_a برای ارزیابی صافی سطح قطعه کار استفاده شده است.

جدول ۲ سایش ابزار و مقادیر سطح سایش هر تست

شماره آزمون	تصویر سایش ابزار	میزان مساحت ساییده شده (mm^2)	زبری سطح (μm)	شماره آزمون	تصویر سایش ابزار	میزان مساحت ساییده شده (mm^2)	زبری سطح (μm)
1		0.42	1.41	10		0.44	0.9
2		0.77	3.37	11		0.42	4.03
3		0.33	0.42	12		0.3	0.58
4		0.43	1.34	13		0.41	1.47
5		0.6	3.46	14		0.61	3.44
6		0.35	0.43	15		0.22	0.6
7		0.5	1.43	16		0.44	1.33
8		0.55	3.36	17		0.37	3.46
9		0.27	0.54	18		0.25	0.6

نمودار اثر اصلی در طرح آزمایش تاگوچی، ابزاری قدرتمند برای بررسی جداگانه تأثیر هر یک از پارامترهای آزمایش بر روی پاسخ مورد نظر است. روش تاگوچی و طرح‌های آزمایش استوار، الگویی است که به واسطه آن امکان ایجاد طرح آزمایش‌ها به شکلی صورت می‌گیرد که نسبت به انتخاب نمونه یا فرآیند استوار بوده و تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد. روش تاگوچی نسبت به روش‌های متداول و رایج مهندسی کیفیت کاملا متفاوت است. متدولوژی روش تاگوچی بر طراحی کیفیت در هنگام طراحی محصولات و فرآیندها تاکید دارد. درحالی که روش‌های متداول بر مبنای بازرسی و کنترل کیفیت در حین فرآیند تولید و یا بعد از تولید محصول تاکید دارند. در واقع تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت، طراحی و ایجاد آن در خود محصول است.

روش تاگوچی مزیت هایی نظیر کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها، امکان بررسی فاکتورهای گسسته (نوع ماده، رنگ قطعه و ...)، تعیین سهم فاکتورها، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده ، امکان بدست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ ، امکان بررسی فاکتورهایی با سطوح مختلف و بررسی تعداد فاکتورهای نامحدود را دارد.

در این نمودار، میانگین پاسخ برای هر سطح از هر پارامتر نشان داده شده و با مقایسه ارتفاع نقاط در هر نمودار، می‌توان به راحتی تأثیر هر سطح از هر پارامتر بر روی سایش ابزار را تشخیص داد.

با توجه به شکل (۴-الف)، افزایش عمق برش بطور کلی منجر به افزایش سایش ابزار می شود. زیرا با افزایش عمق برش، سطح تماس ابزار با قطعه کار بیشتر شده و نیروی برشی وارد بر ابزار نیز افزایش می‌یابد. این افزایش نیرو موجب تولید حرارت

بیشتری در ناحیه برش می‌شود که می‌تواند منجر به نرم شدن لبه‌های برشی و تسریع سایش آن‌ها گردد. همچنین، فشار مکانیکی بیشتر در ناحیه برش باعث تشدید پدیده‌های مانند سایش چسبنده و سایش ساینده می‌شود [16]. در نتیجه، افزایش عمق برش موجب افزایش بار مکانیکی و حرارتی بر ابزار و در نهایت افزایش سایش آن می‌شود.

شکل (۴-ب) رابطه بین نرخ پیشروی و میزان سایش ابزار را نمایش می‌دهد. با بررسی دقیق این نمودار، می‌توان مشاهده کرد که بین این دو متغیر، رابطه ای غیرخطی وجود دارد. افزایش سرعت پیشروی از ۰/۲ میلی‌متر بر دور به ۰/۴ میلی‌متر بر دور منجر به افزایش سایش ابزار می‌شود. زیرا با افزایش پیشروی، حجم براده‌برداری و نیروی برشی وارد بر لبه‌های ابزار بیشتر می‌شود. این افزایش نیرو و تولید حرارت می‌تواند موجب افزایش سایش ابزار گردد. اما افزایش سرعت پیشروی از ۰/۴ به ۰/۶ میلی‌متر بر دور می‌تواند به کاهش سایش ابزار منجر شود، چرا که در سرعت‌های بالاتر، براده‌ها سریع‌تر از ناحیه برش خارج می‌شوند و زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر دور کاهش می‌یابد. این موضوع می‌تواند از تجمع حرارت و براده در ناحیه برش جلوگیری کند. همچنین، افزایش سرعت پیشروی می‌تواند از بروز چسبندگی براده به لبه‌های ابزار جلوگیری کند که به کاهش سایش ابزار کمک می‌کند [17].

شکل (۴-ج) نشان می دهد که افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ دور بر دقیقه به ۳۵۰ دور بر دقیقه می‌تواند منجر به کاهش سایش ابزار شود که به دلیل تغییر در دینامیک برش می باشد. در سرعت‌های بالاتر، زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر چرخش کاهش می‌یابد، که باعث کاهش تجمع حرارت موضعی در لبه‌های برشی می‌شود. این بهبود در توزیع حرارت می‌تواند از افزایش شدید دما که منجر به سایش ابزار می‌شود، جلوگیری کند. همچنین، در سرعت‌های بالاتر، امکان دفع بهتر براده‌ها فراهم می‌شود که از انباشته شدن مواد در لبه‌های ابزار و ایجاد سایش جلوگیری می‌کند. در نتیجه، این عوامل باعث کاهش سایش ابزار در سرعت‌های دورانی بالاتر می‌شوند [18].

شکل (۴-د) نشان می دهد که ابزار TNMG موجب سایدگی بیشتر قرار گرفته است. علت اصلی سایش بیشتر اینسرت TNMGنسبت به DNMG در فرآیند تراشکاری می‌تواند به ویژگی‌های هندسی و عملکردی این دو نوع اینسرت برگردد. اینسرت TNMG با زاویه براده و طراحی خاص خود معمولا برای فرآیندهای روتراشی و ماشین‌کاری قطعات با سطوح بزرگتر استفاده می‌شود. در این شرایط، سطح تماس اینسرت با قطعه کار بیشتر است و این موضوع باعث تولید حرارت و نیروی برشی بالاتر می‌شود. در نتیجه، افزایش دما و تنش‌های مکانیکی در حین فرآیند باعث تسریع در سایش ابزار TNMG می‌شود. در مقابل، اینسرت DNMG با زاویه ۵۵ درجه و طراحی بهینه برای کاهش نیروی برشی، معمولا نیروی کمتری را در حین تراشکاری به وجود می‌آورد. این کاهش نیرو باعث کاهش تولید حرارت و فشار بر لبه‌های برشی می‌شود که به طولانی‌تر شدن عمر ابزار و کاهش سایش آن کمک می‌کند.

در ادامه به بررسی تاثیر پارامترهای تراشکاری بر زبری سطح پرداخته می شود.

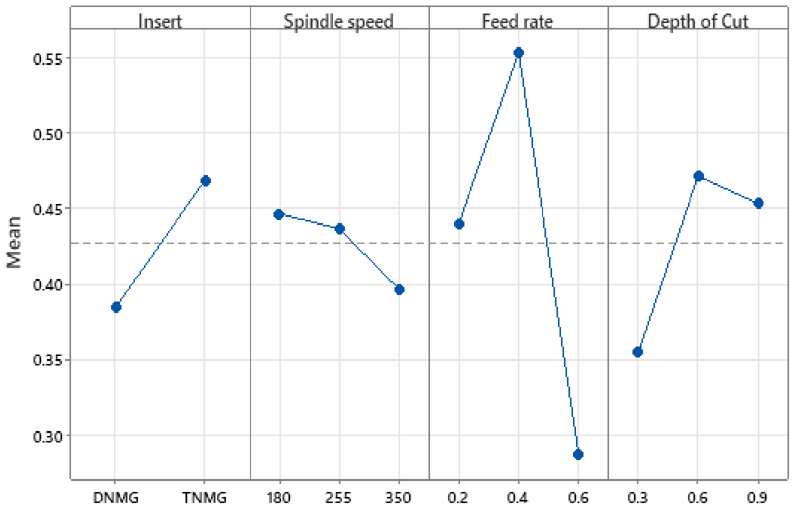
طبق شکل (۵-الف)، افزایش عمق برش می‌تواند موجب کاهش زبری سطح در تراشکاری شود که به دلیل تأثیر آن بر پایداری فرآیند برش و نحوه براده‌برداری. با افزایش عمق برش، نیروی برشی افزایش می‌یابد و این موضوع باعث می‌شود که ابزار به طور مؤثرتر و یکنواخت‌تر با قطعه کار درگیر شود. در این شرایط، ابزار تمایل کمتری به ارتعاش یا لرزش دارد که یکی از عوامل مهم در ایجاد زبری سطح است.

با توجه به شکل (۵-ب)، افزایش سرعت پیشروی از ۰,۲ میلی‌متر بر دور به ۰/۴ میلی‌متر بر دور منجر به افزایش زبری سطح قطعه کار می‌شود، زیرا با افزایش سرعت پیشروی، نرخ براده‌برداری بیشتر می‌شود و ابزار باید حجم بیشتری از ماده را در هر دور از قطعه جدا کند. این افزایش بار برشی می‌تواند منجر به کاهش کیفیت سطح و ایجاد ردهای عمیق‌تر بر روی قطعه شود، که به افزایش زبری سطح منجر می‌گردد. اما با افزایش سرعت پیشروی از ۰/۴ به ۰/۶ میلی‌متر بر دور، زبری سطح کاهش می‌یابد. دلیل این کاهش می‌تواند به بهبود در نحوه تشکیل و جدا شدن براده‌ها و همچنین کاهش زمان تماس ابزار با قطعه کار در هر دور مربوط باشد. در سرعت‌های بالاتر، براده‌ها سریع‌تر و یکنواخت‌تر از سطح قطعه جدا می‌شوند و از تجمع براده در ناحیه برش و ایجاد اصطکاک اضافه جلوگیری می‌شود [17,19]. این عوامل به کاهش زبری سطح کمک کرده و کیفیت سطح بهبود می‌یابد.

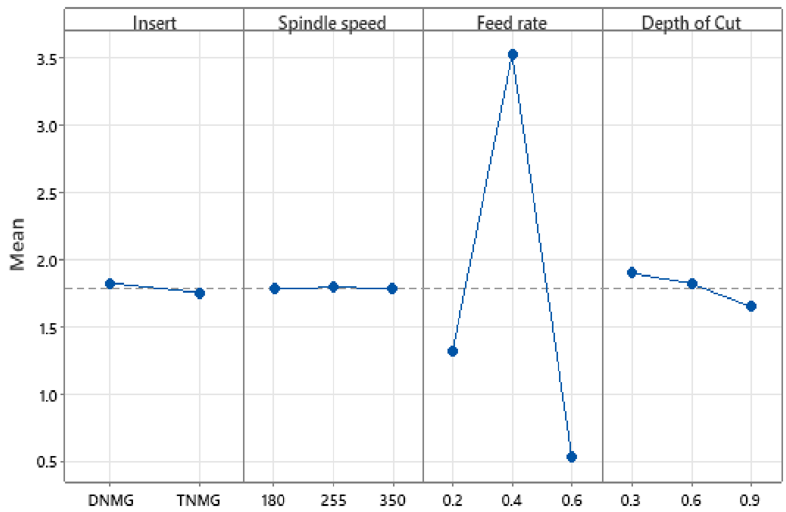
شکل (۵-ج) نشان می‌دهد که سرعت دورانی تاثیر خاصی بر

مقدار زبری سطح ندارد. سرعت دورانی تنها نرخ چرخش قطعه کار را کنترل می‌کند، اما تأثیر آن بر زبری سطح در مقایسه با سایر عوامل کمتر است. اگرچه سرعت‌های دورانی بسیار پایین یا بسیار بالا می‌توانند بر دمای برش یا پایداری فرآیند تأثیر بگذارند، در بازه‌های معمول ماشین‌کاری، تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح به اندازه تأثیر سرعت پیشروی یا عمق برش قابل توجه نیست. در واقع، سرعت پیشروی تعیین می‌کند که هر دندانه ابزار چه مقدار ماده را برمی‌دارد و عمق برش نیز میزان تماس ابزار با قطعه را تعیین می‌کند، که این دو عامل به طور مستقیم بر زبری سطح اثر می‌گذارند [20].

طبق شکل (۵-د) ابزار TNMG باعث زبری سطح کمتری نسبت به DNMG شده است، اما تفاوت زیادی بین آنها مشاهده نشده است. این تفاوت اندک به دلیل ویژگی‌های هندسی هر دو اینسرت است. TNMG با طراحی متقارن و چندین لبه برشی، پایداری بیشتری در فرآیند تراشکاری دارد و این امر به بهبود کیفیت سطح و کاهش زبری کمک می‌کند. از سوی دیگر، DNMG با زاویه ۵۵ درجه نیز طراحی مناسبی برای کاهش نیروی برشی و بهبود کیفیت سطح دارد. هرچند TNMG ممکن است به دلیل پایداری بیشتر در سرعت‌های بالاتر و شرایط سخت‌تر کمی کیفیت سطح بهتری ایجاد کند، اما DNMG نیز عملکرد مطلوبی ارائه می‌دهد. به همین دلیل، اختلاف زبری سطح بین این دو ابزار کم است و تفاوت محسوسی ندارد.



شکل ۴ تاثیر پارامترهای ورودی بر میزان سایش ابزار



شکل ۵ تاثیر پارامترهای ورودی بر صافی سطح

تحلیل واریانس (ANOVA) یک روش آماری است که برای مقایسه تأثیر چندین متغیر مستقل بر یک یا چند متغیر وابسته به کار می‌رود [21]. این روش به محققان اجازه می‌دهد تا بفهمند آیا تفاوت‌های مشاهده‌شده در نتایج به دلیل تغییر در عوامل ورودی است یا اینکه به‌طور تصادفی رخ داده‌اند. ANOVA با استفاده از شاخص‌هایی مانند F-value و P-value کار می‌کند. F-value نسبت تغییرات بین گروه‌ها به تغییرات درون گروه‌ها را نشان می‌دهد، و P-value معناداری آماری این تغییرات را تعیین می‌کند (به‌طور معمول، اگر P-value کمتر از ۰٫۰۵ باشد، اثر معنادار در نظر گرفته می‌شود) [22,23].

در این مطالعه، ANOVA برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری (سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش، و نوع اینسرت) بر دو پارامتر خروجی، یعنی سایش ابزار و زبری سطح، استفاده شده است. این تحلیل کمک می‌کند تا مشخص شود کدام پارامترها تأثیر معناداری بر نتایج خروجی دارند و چگونه می‌توان تنظیمات فرآیند را بهینه‌سازی کرد تا عملکرد ابزار بهبود یابد و کیفیت سطح نهایی ارتقا پیدا کند.

در جدول (۴) مربوط به سایش ابزار، مشخص می‌شود که نرخ پیشروی بیشترین تأثیر را دارد و ۲۱٪ از تغییرات سایش ابزار را توضیح می‌دهد) با F-value برابر ۲۳ و P-value کمتر از ۰/۰۵ که نشان‌دهنده معنی‌دار بودن این تأثیر است .(پس از آن، نوع اینسرت و عمق برش به ترتیب با ۹/۵۶٪ و ۸/۶۴٪ تأثیر مهمی بر سایش ابزار دارند، که مقادیر F-value به ترتیب ۱۰/۱۷ و ۶/۴۱، و مقادیر P-value آنها نیز معنی‌داری تأثیر را تأیید می‌کنند(P-valueکمتر از ۰/۰۵). سرعت اسپیندل تأثیر ناچیزی دارد (۲,۳۳٪) و مقدار F-value برابر با ۰/۱۷، و P-value آن نشان‌دهنده عدم معناداری آماری است.

همچنین، روابط مربعی بین پارامترها مانند نرخ پیشروی و عمق برش نیز در این جدول بررسی شده‌اند که تأثیر نرخ پیشروی مربعی با ۴۳٪ سهم و F-value برابر با ۳۷/۰۲ به‌طور معناداری بر سایش ابزار اثر می‌گذارد.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی مهم‌ترین پارامتر در تأثیرگذاری بر سایش ابزار است و تنظیم صحیح آن نقش کلیدی در کاهش سایش ابزار دارد. نوع اینسرت و عمق برش نیز در این امر تأثیرگذار هستند، در حالی که سرعت اسپیندل تأثیر کمتری دارد و معنی‌دار نیست

جدول (۵) مربوط به تحلیل واریانس (ANOVA) برای زبری سطح است که تأثیر پارامترهای مختلف ماشین‌کاری مانند سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و نوع اینسرت را بررسی می‌کند. نتایج این جدول نشان می‌دهد که نرخ پیشروی با ۶/۲۸٪ بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد. مقدار F-value برای این پارامتر ۵۱۷/۵۹ است و P-value کمتر از ۰/۰۵ به وضوح نشان می‌دهد که این تأثیر به طور آماری معنادار است. این نشان می‌دهد که افزایش یا کاهش نرخ پیشروی به شکل چشمگیری زبری سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جدول ۴ تجزیه و تحلیل واریانس برای سایش ابزار

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	10	0.309541	92.18%	0.309541	0.030954	8.25	0.005
Spindle speed	1	0.007821	2.33%	0.000651	0.000651	0.17	0.689
Feed rate	1	0.070533	21.00%	0.086292	0.086292	23.00	0.002
Depth of Cut	1	0.029008	8.64%	0.024033	0.024033	6.41	0.039
Insert	1	0.032089	9.56%	0.038164	0.038164	10.17	0.015
Spindle speed*Spindle speed	1	0.000579	0.17%	0.001589	0.001589	0.42	0.536
Feed rate*Feed rate	1	0.144400	43.00%	0.138866	0.138866	37.02	0.000
Depth of Cut*Depth of Cut	1	0.018225	5.43%	0.017560	0.017560	4.68	0.067
Spindle speed*Feed rate	1	0.000049	0.01%	0.000011	0.000011	0.00	0.957
Spindle speed*Depth of Cut	1	0.000002	0.00%	0.000136	0.000136	0.04	0.854
Feed rate*Depth of Cut	1	0.006836	2.04%	0.006836	0.006836	1.82	0.219
Error	7	0.026259	7.82%	0.026259	0.003751		
Total	17	0.335800	100.00%				

جدول ۵ تجزیه و تحلیل واریانس برای زبری سطح

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	13	29.3603	99.71%	29.3603	2.2585	104.25	0.000
Spindle speed	1	0.0000	0.00%	0.0106	0.0106	0.49	0.522
Feed rate	1	1.8487	6.28%	11.2125	11.2125	517.59	0.000
Depth of Cut	1	0.1875	0.64%	0.0604	0.0604	2.79	0.170
Insert	1	0.0235	0.08%	0.0737	0.0737	3.40	0.139
Spindle speed*Spindle speed	1	0.0001	0.00%	0.0023	0.0023	0.11	0.760
Feed rate*Feed rate	1	27.0227	91.77%	22.2535	22.2535	1027.25	0.000
Depth of Cut*Depth of Cut	1	0.0087	0.03%	0.0230	0.0230	1.06	0.361
Spindle speed*Feed rate	1	0.0571	0.19%	0.0283	0.0283	1.30	0.317
Spindle speed*Depth of Cut	1	0.1178	0.40%	0.1503	0.1503	6.94	0.058
Feed rate*Depth of Cut	1	0.0151	0.05%	0.0556	0.0556	2.57	0.184
Spindle speed*Insert	1	0.0186	0.06%	0.0297	0.0297	1.37	0.307
Feed rate*Insert	1	0.0579	0.20%	0.0605	0.0605	2.79	0.170
Depth of Cut*Insert	1	0.0026	0.01%	0.0026	0.0026	0.12	0.747
Error	4	0.0867	0.29%	0.0867	0.0217		
Total	17	29.4470	100.00%				

عمق برش و نوع اینسرت به ترتیب با سهم‌های بسیار کمتر ۰٫۶۴٪ و ۰٫۰۸٪ تأثیر کمی بر زبری سطح دارند. مقادیر F-value برای این دو پارامتر نیز پایین است (۲/۷۹ برای عمق برش و ۳٫۴۰ برای نوع اینسرت)، و مقادیر P-value بالاتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهند که تأثیر آن‌ها بر زبری سطح از لحاظ آماری معنادار نیست. سرعت اسپیندل هیچ تأثیر قابل‌توجهی بر زبری سطح ندارد (۰٫۰۰٪)، و مقدار F-value آن ۰/۴۹ و P-value برابر با ۰٫۵۲۲ است که نشان می‌دهد این پارامتر از نظر آماری تأثیر معنی‌داری بر زبری سطح ندارد.

همچنین، تأثیر روابط مربعی مانند نرخ پیشروی مربعی با ۹۱/۷۷٪ سهم و F-value برابر با ۱۰۷۲/۲۵ بسیار معنادار است و بر زبری سطح اثر زیادی می‌گذارد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که نرخ پیشروی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر زبری سطح است. سایر پارامترها، از جمله سرعت اسپیندل، عمق برش، و نوع اینسرت، تأثیر قابل‌توجهی بر زبری سطح ندارند یا تأثیر آن‌ها از لحاظ آماری معنادار نیست.

بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح یکی از تکنیک‌های پیشرفته و کارآمد در بهینه‌سازی چند متغیره است که به‌ویژه در فرآیندهای مهندسی و شیمیایی کاربرد گسترده‌ای دارد. این روش به‌دلیل سادگی در پیاده‌سازی و توانایی ارزیابی چندین پارامتر به‌طور هم‌زمان، از محبوبیت زیادی برخوردار است. اساس این روش بر تعریف توابع مطلوبیت برای پاسخ‌های مختلف و سپس ترکیب این توابع برای دستیابی به یک جواب بهینه استوار است.

در گام اول، برای هر یک از پاسخ‌های مورد نظر (که ممکن است شامل متغیرهایی مانند زمان، هزینه، کیفیت و غیره باشد)، یک تابع مطلوبیت تعریف می‌شود. این تابع معمولا مقادیری بین صفر و یک دارد، به‌طوری‌که مقدار ۱ نشان‌دهنده مطلوب‌ترین حالت (یعنی بهترین مقدار ممکن برای آن پاسخ) و مقدار۰ نشان‌دهنده وضعیت کاملا نامطلوب یا عدم دستیابی به پاسخ مطلوب است. مقدار تابع مطلوبیت برای هر پاسخ، به‌طور خاص با توجه به نوع مسئله و هدف کلی آن تعیین می‌شود. بسته به اینکه هدف فرایند، حداقل‌سازی یک متغیر (مثلا هزینه یا زمان)، حداکثرسازی آن (مثلا بهره‌وری یا کیفیت) یا دستیابی به یک مقدار خاص باشد، تابع مطلوبیت می‌تواند شکل‌های مختلفی داشته باشد.

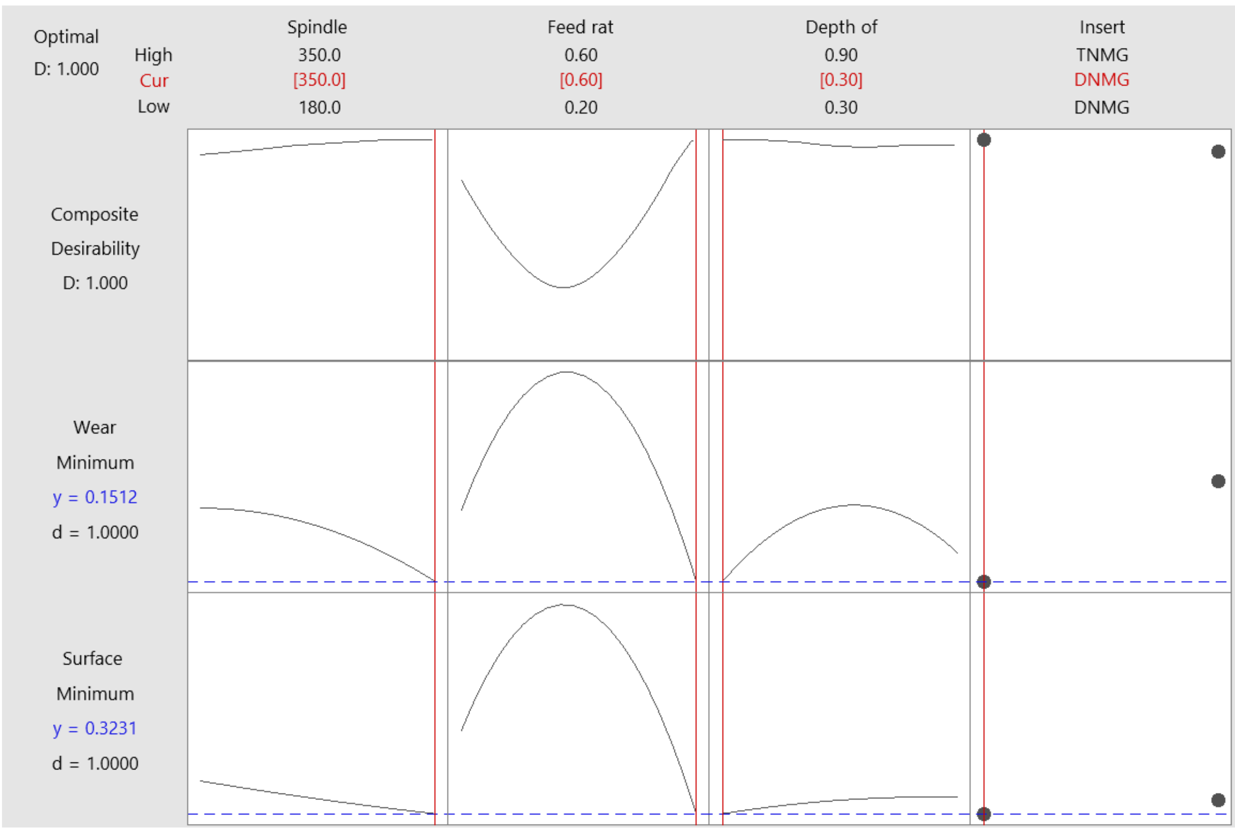
در مرحله بعد، برای ترکیب پاسخ‌های مختلف و دستیابی به یک ارزیابی کلی، از یک تابع ترکیبی استفاده می‌شود. این تابع معمولا به‌صورت میانگین هندسی تعریف می‌شود که از ترکیب

توابع مطلوبیت تمام پاسخ‌ها به دست می‌آید. استفاده از میانگین هندسی به این دلیل است که این روش قادر است تاثیر هر یک از پاسخ‌ها را به‌طور یکسان در نظر بگیرد، در حالی که در برخی دیگر از توابع ترکیبی مانند میانگین حسابی، وزن‌دهی بیشتری به پاسخ‌های با مقدار بالاتر داده می‌شود. به این ترتیب، با استفاده از تابع ترکیبی، می‌توان شرایطی را شبیه‌سازی کرد که در آن تمامی پاسخ‌ها به طور بهینه و هماهنگ به مقادیر مطلوب نزدیک شوند. هدف اصلی در روش مطلوبیت سطح این است که شرایطی از متغیرهای ورودی پیدا شود که در آن مطلوبیت کلی به بیشترین مقدار خود برسد. این هدف در واقع، به‌دست آوردن بهترین ترکیب از متغیرهای ورودی است که باعث بهبود تمامی پاسخ‌ها به صورت همزمان می‌شود. به عبارت دیگر، در این روش نه تنها به دنبال بهینه‌سازی یک متغیر خاص هستیم، بلکه تمامی پاسخ‌های مرتبط با مسئله به‌طور همزمان بهینه می‌شوند.

یکی از مزیت‌های اصلی این روش، انعطاف‌پذیری بالای آن است. به این معنی که برای هر پاسخ می‌توان یک تابع مطلوبیت خاص و مناسب با آن مسئله تعریف کرد. علاوه بر این، در روش مطلوبیت سطح امکان وزن‌دهی به پاسخ‌های مختلف براساس اهمیت آن‌ها وجود دارد. این ویژگی باعث می‌شود که در صورت وجود پاسخ‌های متعدد با اولویت‌های مختلف، بتوان تأثیرگذاری و اهمیت هر یک را در بهینه‌سازی نهایی لحاظ کرد.

در مجموع، بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندهای پیچیده چند متغیره، به مهندسان و پژوهشگران این امکان را می‌دهد که به‌طور کارآمد و علمی به دنبال شرایط بهینه برای سیستم‌های مختلف باشند و از این طریق، عملکرد کلی سیستم را به نحو چشمگیری بهبود بخشند [24].

در شکل (۶)، فرآیند بهینه‌سازی با روش مطلوبیت سطح برای دو پاسخ اصلی یعنی سایش ابزار و زبری سطح انجام شده است. این تحلیل بر اساس چهار متغیر ورودی شامل سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و نوع اینسرت صورت گرفته است. برای هر کدام از این متغیرها، مقادیر بهینه به‌دست آمده‌اند. سرعت اسپیندل ۳۵۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۶ میلیمتر بر دور و عمق برش ۰/۳ میلیمتر به‌عنوان مقادیر بهینه انتخاب شده‌اند، همچنین اینسرت DNMG نیز بهترین انتخاب بوده است.



شکل ۶ نمودار بهینه‌سازی به روش مطلوبیت سطح

برای سایش ابزار، مقدار بهینه ۰/۱۵۱۲ و برای زبری سطح، مقدار بهینه ۰/۳۲۳۱ به‌دست آمده که در هر دو حالت، مقدار مطلوبیت (desirability) برابر با یک است؛ به این معنی که به حداکثر مطلوبیت ممکن رسیده‌ایم. علاوه بر این، مطلوبیت کلی نیز برابر با یک بوده که نشان‌دهنده دستیابی به بهینه‌ترین شرایط ممکن برای هر دو پاسخ است. منحنی‌های ارائه‌شده در شکل نشان می‌دهند که تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج به‌صورت غیرخطی است و مقدار بهینه آن‌ها در نقاط خاصی از بازه‌های تعریف‌شده قرار دارند، به‌ویژه در مورد نرخ پیشروی و عمق برش که مقادیر میانی بهینه‌تر هستند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر پارمترهای ماشینکاری و نوع اینسرت بر کیفیت سطح و عمر ابزار در تراشکاری آلیاژ سخت اینکونل ۷۱۸ پرداخته شده است. از روش تاگوچی برای انجام آزمایش استفاده شده است. نتایج بدست آمده به شرح زیر می باشد:

۱. با افزایش عمق برش، سایش ابزار به دلیل افزایش سطح تماس و نیروی برشی بیشتر می‌شود، اما زبری سطح کاهش می‌یابد، زیرا براده‌برداری یکنواخت‌تر انجام می‌شود و لرزش ابزار کاهش می‌یابد. تأثیر آن بر سایش ابزار ۸/۶۴٪ و بر زبری سطح ۰/۶۴٪ است F-value .برای سایش ابزار ۶/۴۱ و برای زبری سطح ۲/۷۹ بوده، و P-value سایش ابزار کمتر از ۰/۰۵ و زبری سطح بیشتر از ۰/۰۵ است، بنابراین تأثیر آن بر سایش معنادار است اما بر زبری سطح نیست.

۲. افزایش نرخ پیشروی از ۰/۲ به ۰/۴ میلی‌متر بر دور، هم سایش ابزار و هم زبری سطح را افزایش می‌دهد. اما با افزایش بیشتر به ۰٫۶ میلی‌متر بر دور، هر دو کاهش می‌یابند، زیرا زمان تماس کمتر و دفع سریع‌تر براده‌ها باعث کاهش سایش و بهبود کیفیت سطح می‌شود. بیشترین تأثیر را هم بر سایش ابزار (۲۱٪) و هم بر زبری سطح (۶٫۲۸٪) دارد F-value .برای سایش ابزار ۲۳ و برای زبری سطح ۵۱۷/۵۹ بوده و هر دو-P valueکمتر از ۰/۰۵ دارند، که نشان‌دهنده معناداری آماری است.

۳. افزایش سرعت دورانی از ۱۸۰ به ۳۵۰ دور بر دقیقه، باعث کاهش سایش ابزار به دلیل دفع بهتر براده‌ها و کاهش تجمع حرارت می‌شود. تأثیر سرعت دورانی بر زبری سطح کم است و تغییرات معناداری ایجاد نمی‌کند. تأثیر ناچیزی بر سایش ابزار (۲/۳۳ ٪) و زبری سطح (۰/۰۰ ٪) دارد F-value .و-P valueهر دو نشان‌دهنده عدم معناداری آماری است.

۴. اینسرت TNMG نسبت به DNMG سایش بیشتری دارد، اما زبری سطح کمتری ایجاد می‌کند. هرچند تفاوت زبری سطح میان این دو ابزار ناچیز است.۹/۵۶ ٪ از تغییرات سایش ابزار و ۰/۰۸٪ از تغییرات زبری سطح را توضیح می‌دهد F-value . برای سایش ابزار ۱۰/۱۷ و برای زبری سطح ۳/۴۰ بوده و-P value سایش ابزار کمتر از ۰٫۰۵ و زبری سطح بیشتر از ۰/۰۵ است، که نشان می‌دهد تأثیر آن بر سایش معنادار است اما بر زبری سطح نیست.

۵. در فرآیند بهینه‌سازی سایش ابزار و زبری سطح با استفاده از روش مطلوبیت سطح ، سرعت اسپیندل ۳۵۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۶ میلی‌متر بر دور، عمق برش ۰/۳ میلی‌متر و اینسرت DNMG به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. مقدار بهینه سایش ابزار ۰/۱۵۱۲ و زبری سطح ۰/۳۲۳۱ به‌دست آمد که در هر دو حالت، مطلوبیت برابر با ۱ بوده و نشان‌دهنده دستیابی به حداکثر مطلوبیت است. همچنین، تأثیر پارامترهای ورودی بر نتایج غیرخطی بوده و مقادیر بهینه در نقاط میانی بازه‌ها قرار دارند.

با پیشرفت فناوری و توسعه مواد جدید، ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ نیز بهبودهای زیادی خواهد داشت. استفاده از ابزارهای نوین، تکنیک‌های خنک‌کننده پیشرفته و روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید و افزایش بهره‌وری کمک کند. همچنین، تحقیقات بیشتر در زمینه روانکارها و پوشش‌های نوین ابزار می‌تواند به بهبود فرآیند ماشینکاری اینکونل ۷۱۸ کمک کند.

واژه نامه

اینکونل	Inconel
اینسرت	Insert
کروم	Chromium

iron	آهن
molybdenum	مولیبدن
niobium	نیوبیوم
Titanium	تیتانیوم
Aluminum	آلومینیوم
Carbon	کربن
Analysis of Variance	آنالیز واریانس
Optimization	بهینه سازی
P-Value	مقدار P
F-Value	مقدار F
DNMG	نوعی از اینسرت تراشکاری
TNMG	نوعی از اینسرت تراشکاری
Feed rate	نرخ پیشروی
Spindle speed	سرعت دورانی
Depth of cut	عمق برش
Regression	رگرسیون
Contribution	مشارکت
Sum of Squares (SS)	مجموع مربعات
Mean of Squares (MS)	میانگین مربعات
Error	خطا
DF (Degree of Freedom)	درجه آزادی
Adj	تنظیم شده
Desirability function	تابع مطلوبیت
Source	منبع (پارامتر مدنظر)

تشکر و قدردانی

از شرکت بهسازکار نور اصفهان که با تأمین مواد اولیه و همکاری در انجام آزمایشات، نقشی مؤثر در پیشبرد این پژوهش داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنیم.

مراجع

[1] D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, “Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 64, pp. 60–77, 2013. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001

[2] T. M. Pollock and S. Tin, “Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties,” *Journal of Propulsion and Power*, vol. 22, no. 2, pp. 361–374, 2006. https://doi.org/10.2514/1.18239

[3] M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Superalloys: A Technical Guide*, 2nd ed. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2002. https://doi.org/10.31399/asm.tb.stg2.9781627082679

[4] H. Khochtali, Y. Ayed, F. Zemzemi, and W. Bensalem, “Tool wear characteristics in rough turning of Inconel 718 with coated carbide tool under conventional and high-pressure coolant supplies,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, pp. 2371–2386, 2021. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07002-9

[5] F. Jafarian, D. Umbrello, S. Golpayegani, and Z. Darake, “Experimental investigation to optimize tool life and surface roughness in Inconel 718 machining,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 13, pp. 1683–1691, 2016. https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1090592

[6] X. Liang, Z. Liu, and B. Wang, “State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review,” *Measurement*, vol. 132, pp. 150–181, 2019. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.045

[7] P. Jeyapandiarajan and A. Xavior, “Influence of cutting condition on machinability aspects of Inconel 718,” *Journal of Engineering Research*, vol. 7, no. 2, 2019.

[8] F. Zhujani, F. Abdullahu, G. Todorov, and K. Kamberov, "Optimization of multiple performance characteristics for CNC turning of Inconel 718 using Taguchi–Grey relational approach and analysis of variance," *Metals*, vol. 14, no. 2, p. 186, 2024. https://doi.org/10.3390/met14020186

[9] R. S. Pawade, S. S. Joshi, P. K. Brahmankar, and M. Rahman, "An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192–193, pp. 139–146, 2007. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.049

[10] S. A. Khan, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, C. Sage, P. Harden, M. Fleming, A. White, and R. M'Saoubi, "Tool wear/life evaluation when finish turning Inconel 718 using PCBN tooling," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 283–288, 2012. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.049

[11] W. Frifita, S. B. Salem, A. Haddad, and M. A. Yallese, "Optimization of machining parameters in turning of Inconel 718 nickel-base super alloy," *Mechanics & Industry*, vol. 21, no. 2, p. 203, 2020. https://doi.org/10.1051/meca/2020001

[12] C. Pinheiro, M. Y. Kondo, S. S. Amaral, E. S. Callisaya, J. V. C. De Souza, M. C. De Sampaio Alves, and M. V. Ribeiro, "Effect of machining parameters on turning process of Inconel 718," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, no. 12, pp. 1421–1437, 2021. https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1914839

[13] F. Zhujani, F. Abdullahu, G. Todorov, and K. Kamberov, "Optimization of multiple performance characteristics for CNC turning of Inconel 718 using Taguchi–Grey relational approach and analysis of variance," *Metals*, vol. 14, no. 2, p. 186, 2024. https://doi.org/10.3390/met14020186

[14] L. Tan, C. Yao, X. Li, Y. Fan, and J. Cui, "Effects of machining parameters on surface integrity when turning Inconel 718," *Journal of Mechanical Engineering and Performance*, vol. 31, no. 5, pp. 4176–4186, 2022. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06523-4

[15] M. Ghalami-Choobar, G. Liaghat, M. Sadighi, and H. Ahmadi, "Optimization of manufacture process of Glass/Polycarbonate thermoplastic laminates using Taguchi method," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 37–43, 2019. [In Persian]

[16] M. Sadílek, J. Dubský, Z. Sadílková, and Z. Poruba, "Cutting forces during turning with variable depth of cut," *Perspectives in Science*, vol. 7, pp. 357–363, 2016. https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.055

[17] M. Kuntoğlu and H. Sağlam, "Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning," *Measurement*, vol. 140, pp. 427–436, 2019. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.022

[18] L. Hu, W. Cai, L. Shu, K. Xu, H. Zheng, and S. Jia, "Energy optimisation for end face turning with variable material removal rate considering the spindle speed changes," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 8, pp. 625–638, 2021. https://doi.org/10.1007/s40684-020-00210-w

[19] M. Hasanifard, R. Azarafza, M. H. Alaee, and M. Najafi, "Experimental investigation of the effect of machining parameters on the surface quality in turning aluminum base composite reinforced with Mg_2 Si particles," *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 11, no. 9, pp. 13–25, 2024. [In Persian]

[20] P. Albertelli, V. Mussi, C. Ravasio, and M. Monno, “An experimental investigation of the effects of spindle speed variation on tool wear in turning,” *Procedia CIRP*, vol. 4, pp. 29–34, 2012. https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.10.006

[21] M. Baraheni, M. R. Shabgard, S. Amini, and F. Gholipour, “Experimental evaluation and optimization of parameters affecting delamination, geometrical tolerance and surface roughness in ultrasonic drilling of 3D-printed PLA thermoplastic,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 14, no. 2, p. 186, 2024. https://doi.org/10.1177/08927057241264803

[22] S. Amini, M. Baraheni, and A. Mardiha, “Parametric investigation of rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastics,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 232, no. 5, pp. 540–554, 2018. https://doi.org/10.1177/0954408917727199

[23] M. Baraheni and S. Amini, “Influence of machining condition and nano-graphene incorporation on drilling load and hole quality in both conventional drilling and ultrasonic-assisted drilling of CFRP,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 49, pp. 14593–14606, 2024. https://doi.org/10.1007/s13369-024-08758-4

[24] A. Tabatabaeian, M. Baraheni, S. Amini, and A. R. Ghasemi, “Environmental, mechanical and materialistic effects on delamination damage of glass fiber composites: Analysis and optimization,” *Journal of Composite Materials*, vol. 53, no. 26–27, pp. 3671–3680, 2019. https://doi.org/10.1177/0021998319844811